

УДК 621.313.13

## ПОСТРОЕНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ВИТКОВОГО ЗАМЫКАНИЯ ОБМОТКИ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ

В.И. Полищук

Томский политехнический университет

E-mail: polischukvi@tpu.ru

*Предложен новый способ защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния. Разработано и исследовано на экспериментальной установке устройство, реализующее релейную защиту, определена методика настройки нового устройства.*

### Ключевые слова:

*Синхронный генератор, обмотка ротора, витковое замыкание, релейная защита.*

### Key words:

*Synchronous generator, rotor winding, short circuit of coils, relay protection.*

### Введение

Витковые замыкания (ВЗ) в обмотке ротора синхронных генераторов (СГ) являются распространенными [1] и трудно поддающимися контролю неисправностями [2]. Ввиду конструктивных особенностей выявление ВЗ в обмотке ротора на основе штатных средств – трудно разрешимая задача. Наиболее перспективными являются способы, основанные на анализе внутреннего и внешнего магнитных полей СГ, поскольку исправно функционирующий СГ имеет в воздушном зазоре, в сердечнике и вокруг него, установившуюся симметричную форму распределения магнитного поля, которая несет информацию, имеющую прямую функциональную связь с техническим состоянием СГ. Для контроля ВЗ в роторе, основанного на анализе симметрии магнитного поля машины, необходима установка специализированного датчика магнитного поля.

Следует отметить, что для задач релейной защиты важным является определение не величины составляющих магнитного поля, а степени нарушения пространственной структуры распределения поля от обмотки, т. е. требуется определение изменения текущих значений поля полюсов относительно друг друга.

Известен ряд устройств [3–5], содержащих индукционный датчик (ИД), установленный в воздушном зазоре вблизи поверхности ротора. При такой установке ИД получают максимальную чувствительность, так как ВЗ определяется по амплитуде импульсов ЭДС, зависящих от полного тока в пазах каждой катушки полюса. Однако размещение ИД в воздушном зазоре или вблизи его значительно снижает надежность СГ за счет возможного касания его ротором во время эксплуатации с последующим отрывом, что неизбежно приведет к выходу генератора из строя. На мощных СГ датчик должен выдерживать без повреждения огромные ветровые нагрузки при давлении порядка двух атмосфер и скорости потока до 50...100 м/сек. Кроме того, такой датчик легко повредить во время вывода ротора при ремонтных работах.

### Постановка задачи

При проведении исследования ставилась задача получения признаков ВЗ в обмотке ротора СГ и разработки способа защиты на основе датчика магнитного поля рассеяния, устанавливаемого в торцевой зоне СГ.

### Экспериментальная установка

Состав экспериментальной установки представлен на рис. 1. Для измерения потока рассеяния применен ИД. Она состоит из синхронного генератора с числом пар полюсов  $p=1$  (ГАБ-4-Т/230) – 1, приводимого во вращение асинхронным двигателем, питаемым частотным преобразователем (Altivar 71) – 9. Для создания замыкания с обмотки ротора выведены через дополнительные контактные кольца – 2 отпайки – 3 (4, 10 и 30 % витков полюса). В СГ на подшипниковом щите установлен ИД – 4, сигнал с которого через коннектор ввода (СВ-68LP) – 5 и плату ввода/вывода (NI PCI 6024Е, 12 разрядов, максимальная частота дискретизации 20 МГц, 16 аналоговых входов) – 6 подается в промышленный компьютер – 7 с монитором – 8.

На рис. 2 представлены экспериментальные осциллограммы ЭДС на выходе ИД при наличии замыкания в одном из двух полюсов СГ (для наглядности показано замыкание 30 % витков) на холостом ходу (рис. 2, а) и с нагрузкой (рис. 2, б). Кривой 1 обозначена осциллограмма при наличии ВЗ в обмотке ротора, кривой 2 – без ВЗ. Как видно из осциллограмм, при замыкании в одном из полюсов ротора положительная и отрицательная полуволны ЭДС не симметричны. Они отличаются как по амплитуде, так и по форме. Следовательно, разница положительной и отрицательной полуволн ЭДС на выходе ИД может служить информационным признаком ВЗ в обмотке ротора.

### Способ защиты

Способ защиты основан на том, что индукция магнитного поля в произвольной точке торцевой зоны СГ формируется токами в обмотках статора и ротора, а магнитодвижущие силы всех полюсов

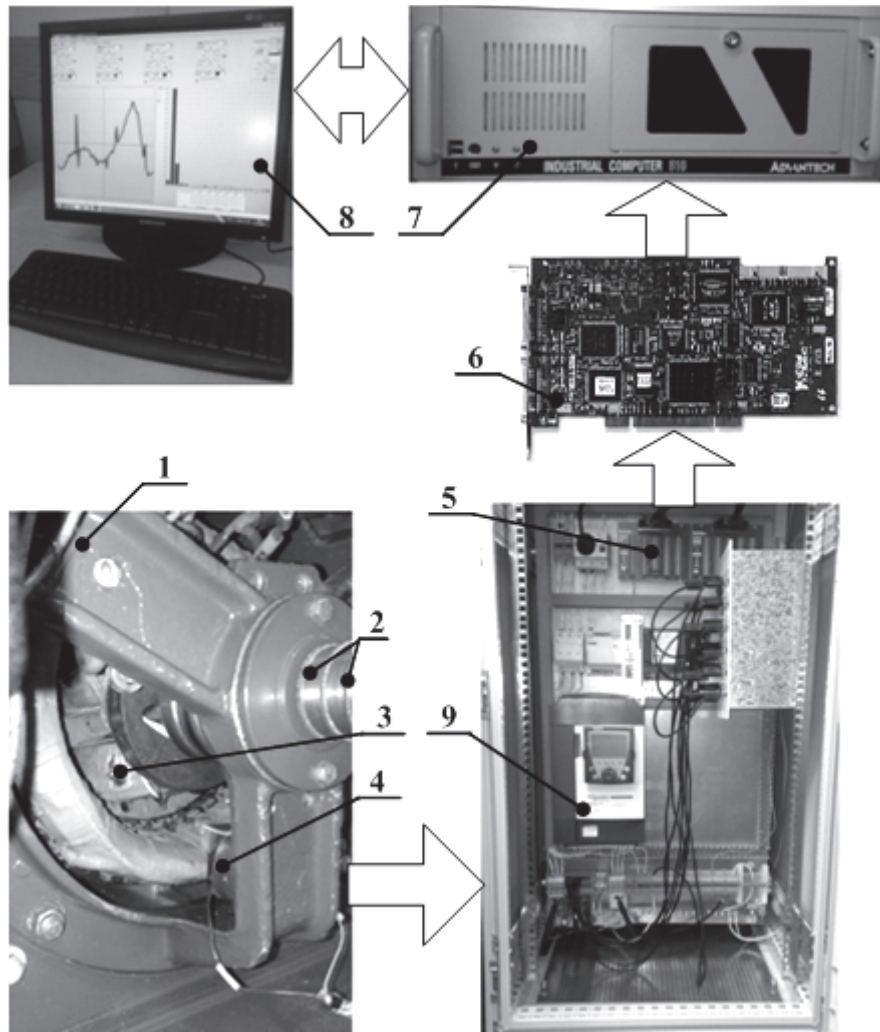


Рис. 1. Экспериментальная установка

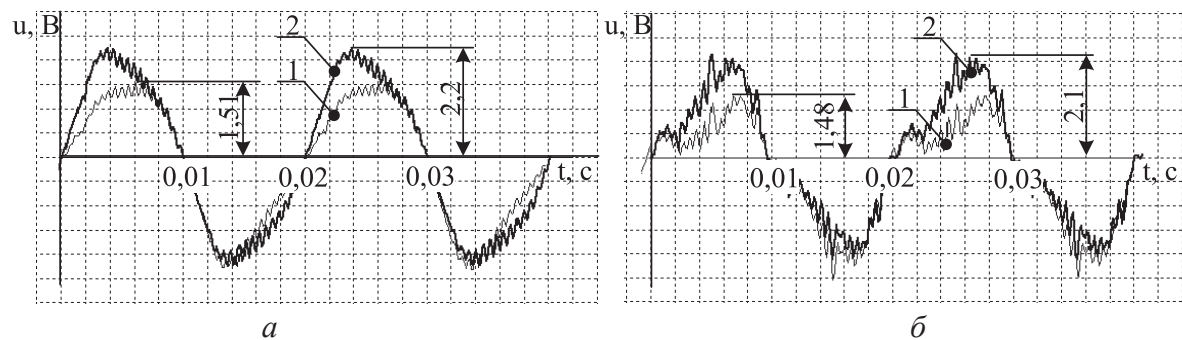


Рис. 2. Осциллограммы ЭДС на выходе индукционного датчика при ВЗ в полюсе обмотки ротора: а) в режиме холостого хода; б) в режиме номинальной нагрузки

ротора равны по величине. Если ее измерить и преобразовать в однополярный электрический сигнал, то в нем при каждом полном обороте ротора будет появляться  $2p$  равных по величине полувольт. Если часть витков одного из полюсов замкнется, то его магнитодвижущая сила, а, следовательно, и индукция магнитного поля в торцевой зоне уменьшится. Тогда в однополярном сигнале при каждом полном обороте ротора одна из  $2p$  по-

лувольт будет меньшей величины. Это вызовет появление гармонической с частотой  $f_v = f_s/p$ , где  $f_s$  — частота сети. Величина  $f_v$  пропорциональна числу замкнувшихся витков полюса ротора. Если  $f_v$  превысит установленную величину, то формируется сигнал о повреждении в обмотке ротора СГ или, если устройство работает в качестве защиты, сигнал на гашение магнитного поля ротора и отключение СГ от сети.

Для реализации способа было спроектировано устройство, функциональная схема которого приведена на рис. 3, где: ИД – измерительный датчик; В1, В2 – блоки формирования однополярного сигнала (выпрямители); ФВЧ – фильтр высоких частот для подавления постоянной составляющей в однополярном сигнале; ФНЧ1 – фильтр низких частот для выделения периодической составляющей частотой  $f_v$ ; ФНЧ2 – фильтр низких частот для формирования величины входного сигнала на триггер Шмита (ТШ); ФНЧ3 – фильтр низких частот, формирующий опорное напряжение (уставку); ТШ – неинвертирующий триггер Шмита.

При наличии повреждения в обмотке ротора СГ сигнал с ИД, после В1, содержит полезный сигнал в виде субгармонической частоты  $f_s$ , а также частоту пульсаций  $2f_s$  и постоянную составляющую, которые необходимо подавить. Для правильной работы ТШ необходимо сравнить величину полезного сигнала с величиной сигнала с ИД. В качестве опорного напряжения выступает постоянная составляющая после В1, поскольку она пропорциональна сигналу с ИД, а, изменяя коэффициент усиления на ФНЧ3, можно задавать величину уставки.

Выделение субгармонической частоты  $f_s$  осуществляется аналоговым полосовым фильтром (ПФ), состоящим из ФВЧ и ФНЧ1. В связи с тем, что расстояние на частотной оси логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) составило всего одну октаву, был применен несимметричный ПФ.

Схема ПФ представлена на рис. 4. Он состоит из комбинации каскадов ФВЧ и ФНЧ1 фильтров. Требуемое количество каскадов ФНЧ1 определяется необходимой глубиной подавления гармоник с частотой  $2f_s$ .

Уровень полезного сигнала в ПФ повышается с ростом порядка ФНЧ1, но при этом увеличивается время отклика ПФ, что негативно сказывается на быстродействии устройства. В отличие от ФНЧ1 каждый последующий каскад ФВЧ увеличивает скорость нарастания амплитуды, уменьшая время задержки. Данное свойство было применено в синтезе ПФ. Из-за снижения амплитуды полезного сигнала в каждом каскаде на 3 дБ или в  $\sqrt{2}$  раз в ФНЧ1 введено звено усиления.

ФВЧ состоит из  $m$  элементов с постоянной времени  $\tau_{\epsilon,j}$ , ФНЧ1 содержит  $n$  элементов с постоянными времени  $\tau_{н,j}$  и коэффициентом усиления  $k_i$ .

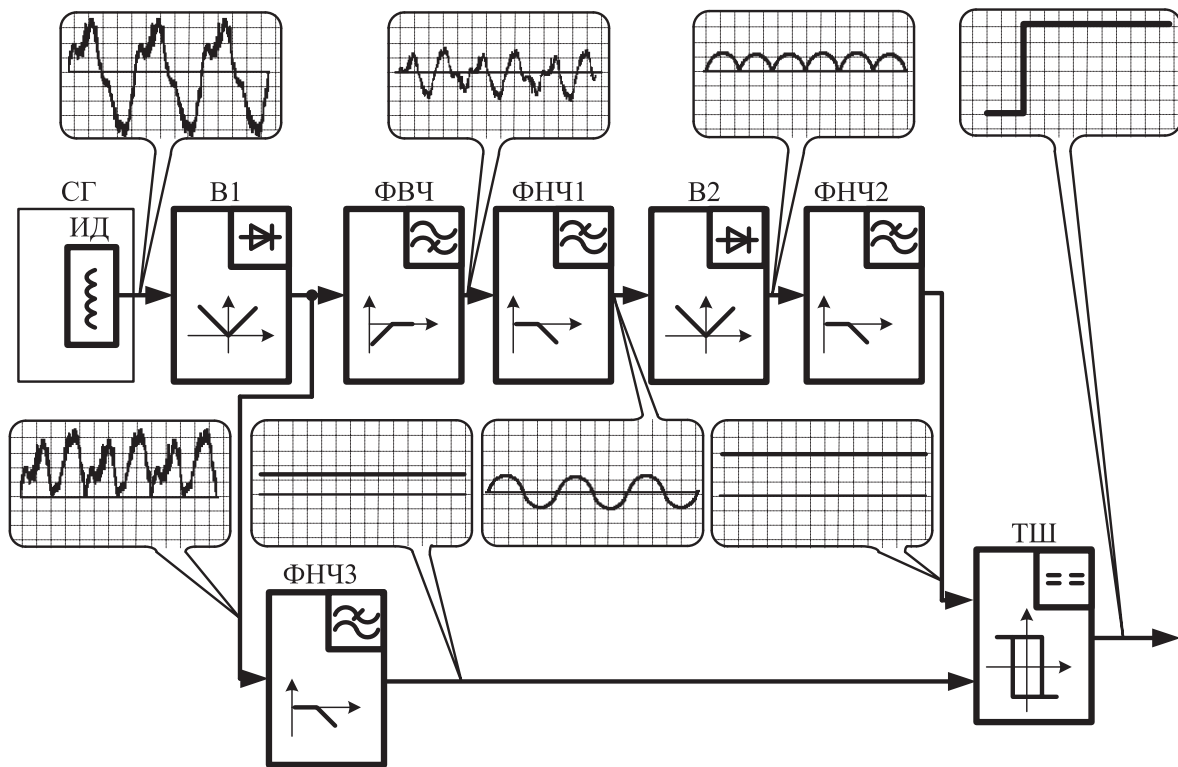


Рис. 3. Функциональная схема устройства релейной защиты

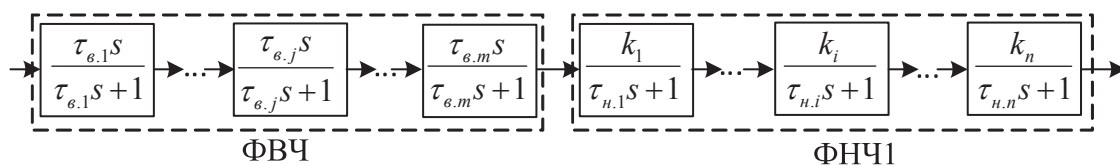


Рис. 4. Структурная схема ПФ

в каждом звене. Передаточные характеристики звеньев ПФ можно представить как

$$W_{\Phi ВЧ}(s) = \prod_{j=1}^m \frac{\tau_{e,j}s}{\tau_{e,j}s + 1}; \quad W_{\Phi НЧ}(s) = \prod_{i=1}^n \frac{k_i}{\tau_{n,j}s + 1},$$

где  $W_{\Phi ВЧ}(s)$ ,  $W_{\Phi НЧ}(s)$  – передаточные функции ФВЧ и ФНЧ1;  $\tau_{ni}$ ,  $\tau_{e,i}$  – постоянные времени звеньев каскадов;  $n$ ,  $m$  – количество каскадов ФВЧ и ФНЧ1, соответственно.

Передаточная функция ПФ имеет вид

$$W_{ПФ}(s) = W_{\Phi ВЧ}(s) \cdot W_{\Phi НЧ}(s).$$

Постоянные времени для звеньев фильтра находятся из расчёта необходимой частоты пропускания фильтра и определяются из выражений

$$\tau_e = \frac{1}{2\pi f_e}; \quad \tau_n = \frac{1}{2\pi f_n},$$

где  $f_e$ ,  $f_n$  – частоты полосы пропускания ФВЧ и ФНЧ1 фильтров.

Ослабление полезного сигнала на каждом каскаде фильтра составляет

$$\Delta A = \Delta A_j = \Delta A_i = \frac{1}{\sqrt{2}},$$

где  $\Delta A_j$ ,  $\Delta A_i$  – ослабление в каскадах ВЧ и НЧ фильтров.

Общее ослабление полезного сигнала пропорционально общему числу каскадов и равно коэффициенту усиления, необходимого для компенсации ослабления в фильтре, значение которого определяется выражением

$$K = \left( \frac{1}{\Delta A} \right)^{n+m},$$

где  $K$  – коэффициент усиления ПФ.

Поскольку усиление производится только в звеньях ФНЧ1, то величина коэффициента усиления  $k_i$  в его каскадах равна

$$k_i = \sqrt[n]{K}.$$

Коэффициент усиления использованного ПФ составил  $K=512$ , а усиление в каждом каскаде ФНЧ1 было  $k \geq 1,682$ . ЛАЧХ данного ПФ представлен на рис. 5. При заданных параметрах фильтра сигнал с частотой  $2f_s$  по отношению к  $f_s$  был ослаблен в 59,6 раз.

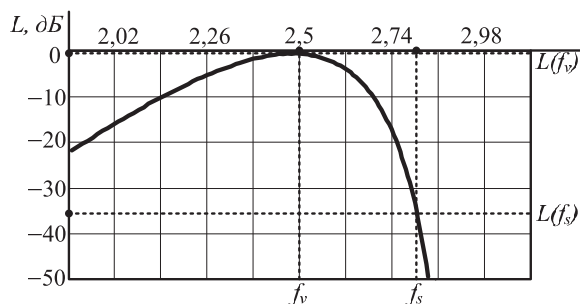


Рис. 5. ЛАЧХ ПФ

Для настройки устройства был смоделирован тестовый сигнал. На рис. 6 представлен вид тестового сигнала после преобразования в однополярный 1 ( $U_{B1}$ ). Он состоит из пяти частей. I – низкий нормальный сигнал (полуволны симметричны), II – полуволны отличаются на 2 % (на рис. 6. для наглядности разница полуволн больше), III – участок роста полуволн (имитация переходного процесса), IV – высокий сигнал с разницей амплитуд полуволн в 2 %, V – высокий нормальный сигнал. На рис. 6 цифрой 2 ( $U_{оп}$ ) обозначено опорное напряжение ТШ, сформированное из выделенной постоянной составляющей  $U_{B1}$ , а 3 и 4 – входное и выходное напряжение ТШ, соответственно.

Для исключения многократных срабатываний вблизи точки переключения величина электрического гистерезиса ТШ отстроена на уровне 20 %.

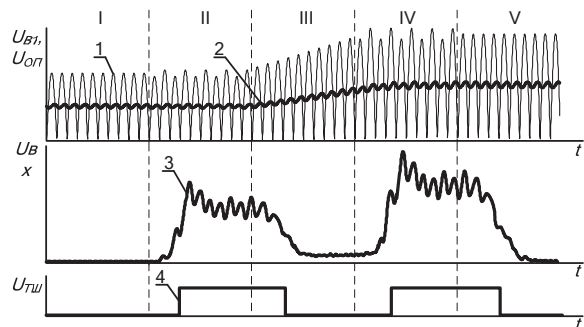


Рис. 6. Диаграмма работы устройства на тестовом сигнале: 1 – тестовый сигнал после  $B1$ , 2 – опорное напряжение ТШ, 3 – входное напряжение ТШ, 4 – выходное напряжение ТШ

Как видно на рис. 6, ТШ срабатывает в частях II и IV, соответствующих имитации замыкания двухпроцентного количества витков. Запаздывание момента срабатывания ТШ (порядка 2-х периодов или 0,04 с) обусловлено временем задержки в работе фильтров. При этом устройство работало логически верно.

После настройки на тестовом сигнале работа устройства была проверена на экспериментальном СГ. Устройство надежно определяло ВЗ в обмотке ротора при замыкании 4 % витков полюса. При этом не было выявлено ложного срабатывания в режимах сброса/наброса нагрузки, включения возбуждения, несимметричной нагрузки по фазам, замыкания на землю в одной точке цепи возбуждения и замыкания на землю фазы статора. Срабатывание устройства зафиксировано в начальный момент трехфазного короткого замыкания на выводах СГ, но данный режим непродолжителен и должен, без выдержки времени, отключиться основными защитами СГ, а введение отстройки по времени исключит ложную работу разрабатываемой защиты.

## Выводы

1. Витковое замыкание в полюсе ротора синхронного генератора вызывает нарушение симме-

- трии магнитного поля рассеивания и путем измерения специализированным датчиком степени нарушения поля рассеивания от поврежденного полюса относительно неповрежденного полюса можно диагностировать витковое замыкание.
- Преобразование ЭДС на выходе индукционно-го датчика в однополярный сигнал с последую-

- щим выделением субгармонической частоты, равной частоте вращения ротора, позволяет определить замыкание витков обмотки ротора.
- В результате проведенных экспериментов было выявлено, что разработанное устройство способно надежно определять замыкание 4 % витков обмотки ротора синхронного генератора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Самородов Ю.Н. Турбогенераторы. Аварии и инциденты. — М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. — 488 с.
- Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Диагностика турбогенераторов. — Л.: Наука, 1989. — 119 с.
- Алексеев А.Е., Костенко М.П. Турбогенераторы. — М.: Госэнергоиздат, 1939. — 341 с.
- Wood J.W., Hindmarch R.T. Rotor winding short detection // IEEE Proceedings. — 1986. — V. 133. — № 8. — P. 181–189.
- Способ диагностики и контроля витковых замыканий в роторе синхронной машины: пат. 2192649 Рос. Федерация. № 2000129947/09; заявл. 30.11.2000; опубл. 10.11.2002, Бюл. № 5. — 4 с.

Поступила 17.09.2012 г.

УДК 621.316.925

### ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОБМОТКИ СТАТОРА ГЕНЕРАТОРА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ С НАЛОЖЕНИЕМ КОНТРОЛЬНОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ ЗАМЫКАНИЯХ

А.В. Доронин

ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары

E-mail: doronin\_av@ekra.ru

*Рассматриваются условия функционирования защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, выполненной на принципе наложения контрольного тока с частотой, отличающейся от промышленной, при дугowych перемежающихся замыканиях. Вскрыт механизм формирования составляющей с частотой контрольного тока в токе замыкания, выявлены основные факторы, от которых зависит значение этой составляющей, и дана количественная оценка влияния этих факторов.*

#### Ключевые слова:

*Защита от замыканий на землю, обмотка статора генератора, устойчивые и перемежающиеся дуговые замыкания.*

#### Key words:

*Earth fault protection, stator winding of the generator, stable and intermittent arc faults.*

В настоящее время к защите от замыканий на землю в обмотке статора генераторов предъявляется определенный набор требований, главным из которых является отсутствие зоны нечувствительности при замыкании вблизи нейтрали, работоспособность как при устойчивых, так и при дугowych перемежающихся замыканиях. Для случаев, когда генератор имеет гальваническую связь с другими генераторами или с внешней сетью к защите также предъявляется требование избирательности.

Одним из таких случаев является довольно широко применяемая в последнее время схема блока генератор-трансформатор с питанием потребителей собственных нужд или потребителей некоторой внешней сети через реактированную отпайку [1]. Суммарный емкостный ток замыкания на землю присоединенной к реактору сети, как правило, составляет 5...10 А, и сеть работает с изолированной нейтралью.

Для защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора в таких блоках в ООО НПП «ЭКРА» разработана и применена на нескольких электростанциях защита, основанная на наложении на первичные цепи контрольного тока с частотой 25 Гц через вторичные обмотки типового трансформатора напряжения, соединенные в разомкнутый треугольник [2]. Причем в разомкнутый треугольник соединяются основные вторичные обмотки, т. к. это позволяет при прочих равных условиях получить больший контрольный ток. Схема включения элементов защиты приведена на рис. 1.

Генератор контрольного тока (ГКТ) включается в цепь разомкнутого треугольника трансформатора напряжения TV1 через фильтр присоединения, состоящий из последовательно соединенных линейного дросселя и конденсатора, настроенных в резонанс на частоте 25 Гц.